СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 691.32 EDN: EVEAWF

[1,*]Логинова С. А., [2]Таничев М. В., [2]Гоглев И. Н., [1]Савченко А. Е.
[1]Ярославский государственный технический университет,
[2]Ивановский государственный технический университет
**E-mail: sl79066171227@yandex.ru*

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ БЕТОНА НАНОЧАСТИЦАМИ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОНА

В статье поднимается вопрос влияния наночастиц на структуру и свойства бетона. Рассматриваются различные типы наномодификаторов, включая наночастицы карбида кремния и тетрафторбората аммония, которые вводятся в бетонную смесь для улучшения её физико-механических характеристик. В результате исследования было установлено, что добавка на основе тетрафторбората аммония — наиболее эффективный ускоритель твердения цементного камня. Незначительное удорожание (менее 2 %) полностью компенсируется ускорением работ и экономией материала, что делает её применение в монолитном строительстве экономически оправданным.

Ключевые слова: *наночастицы, бетон, физико-механические свойства, модификация, долговечность.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. В настоящее время в строительной отрасли всё более востребованными становятся высокопрочные и высококачественные бетоны, позволяющие снижать материалоемкость конструкций, уменьшать сроки строительства и повышать долговечность зданий и сооружений [1–3].

Известно, что цемент имеет ключевое значение в формировании стоимости бетонных изделий. В связи с этим оптимизация расхода цемента в процессе изготовления бетонных и железобетонных конструкций становится актуальной задачей в современном строительстве. Для достижения экономии и улучшения характеристик бетона используются различные добавки — пластификаторы и модификаторы [4, 5].

На данный момент рынок предлагает очень широкий ассортимент различных добавок для улучшения качества бетонов [6–10]. При этом предполагается увеличение прочности бетонов при сохранении расхода вяжущего или экономия расхода вяжущего при сохранении прочности, а также улучшение удобоукладываемости бетонной смеси. Стоимость наиболее известных отечественных и зарубежных добавок (пластификаторов, суперпластификаторов и др.) изменяется в широких пределах — от 40 до 200 тыс. руб. за тонну [11–14]. Высокая цена добавок приводит к повышению себестоимости конечного продукта, и поэтому не все производственники стремятся использовать эти добавки [12, 15].

Одним из наиболее эффективных и быстроразвивающихся направлений повышения физико-механических характеристик цементных бетонов является наномодификация — введение в состав бетонной смеси нанодисперсных добавок, способных регулировать процессы структурообразования на микро- и наноуровне [2, 6–8]. Однако многие из существующих нанодобавок, например углеродные нанотрубки, нанокремнезем, фуллерены [5, 6], имеют высокую стоимость, сложны в диспергировании и требуют специального оборудования, что ограничивает их широкое промышленное внедрение. В связи с этим актуальными являются разработка и исследование доступных, технологичных и эффективных нанодобавок на основе недорогих химических соединений. Соединения на основе фторборатов и фторсиликатов, согласно теоретическим предпосылкам, обладают хорошим потенциалом для ис-

пользования в качестве активных компонентов нанодобавок, однако систематических экспериментальных данных об их влиянии на физико-механические характеристики цементного камня в научной литературе недостаточно [9–11].

Постановка задачи. ***Цель исследования*** заключается в оценке влияния нанодисперсных добавок на основе карбида кремния и тетрафторбората аммония на физико-механические характеристики цементного камня и определении оптимальных дозировок, обеспечивающих достижение требуемых физико-механических параметров при минимальном расходе добавок.

Задачи исследования:

– сформулировать теоретическое обоснование механизма действия фторборатных нанодобавок в цементной системе;

– подобрать рецептуры и приготовить контрольные и модифицированные образцы цементного камня с различным процентным содержанием добавок (карбид кремния, тетрафторборат аммония);

– провести лабораторные испытания образцов с целью определения их физико-механических показателей;

– выполнить сравнительный анализ эффективности добавок и определить оптимальные их дозировки, в том числе с экономической точки зрения.

Объект исследования — цементный камень на основе портландцемента марки М500Д0, модифицированный нанодисперсными добавками различной химической природы (инертный наполнитель — карбид кремния, активные добавки — тетрафторборат аммония).

Методика исследования. Экспериментальные исследования проводились с целью верификации теоретических предпосылок о влиянии комплексных нанодобавок на основе фторсодержащих солей на физико-механические характеристики цементного камня.

В качестве основного вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, соответствующий требованиям ГОСТ 31108-2020. Для изготовления образцов применялась дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72). Для испытания были выбраны следующие нанопорошки: карбид кремния и тетрафторборат аммония.

Для приготовления и испытания образцов использовалось следующее оборудование (рис. 1):

– весы электронные Mucheng 0,1–500 г (погрешность взвешивания ±0,01 г) и лабораторные весы до 5 кг;

– испытательная машина, предназначенная для определения предела прочности при изгибе цементных образцов МИИ-100;

– камера влажного твердения с регулируемой влажностью (99–100 %) и температурой (20±2 ºС);

– пресс испытательный гидравлический ПСУ-10 (максимальное усилие до 100 кН);

– металлические формы для изготовления образцов-кубов (по ГОСТ 22685-89).

Изготовление образцов производилось в соответствии с требованиями ГОСТ 310.4-81 (рис. 2).



а б в

Рисунок 1 — Оборудование для проведения испытаний: а) весы электронные Mucheng; б) испытательная машина МИИ-100; в) пресс испытательный ПСУ-10



Рисунок 2 — Образцы модифицированных цементных смесей

После изготовления образцы помещались в камеру нормального твердения с температурой 20±2 ºС и относительной влажностью воздуха 95–100 %. Выдерживание образцов производилось в течение 28 суток. Испытания на прочность на сжатие проводились методом разрушающего контроля на гидравлическом прессе в соответствии с ГОСТ 10180-2012.

Изложение материала. Для обеспечения корректности сравнительного анализа в первую очередь были определены прочностные характеристики контрольных (немодифицированных) образцов цементного камня. Результаты определения средней прочности на сжатие контрольных образцов представлены в таблице 1.

Анализ данных таблицы 1 показывает, что кинетика твердения контрольных образцов соответствует нормативным закономерностям: наиболее интенсивный прирост прочности наблюдается в первые 7–14 суток, к 28-суточному возрасту прочность стабилизируется на значении 49,8 МПа, что полностью соответствует характеристикам цемента М500.

Добавка № 1 (карбид кремния, SiC).

Добавка представляет собой композицию дистиллированной воды и нанопорошка карбида кремния SiC. Согласно теоретическим предпосылкам [9], карбид кремния выступает в роли инертного нанонаполнителя, не вступающего в химическое взаимодействие с продуктами гидратации портландцемента при нормальных условиях, но потенциально способного заполнять поровое пространство.

На рисунке 3 представлена кинетика твердения образцов с добавкой № 1 в сравнении с контрольными образцами.

Максимальная прочность среди образцов с добавкой № 1 достигнута при содержании SiC 7 % от массы цемента и составила 53,62 МПа в 28-суточном возрасте.

Добавка № 2 (тетрафторборат аммония, $NH_4[BF_4]$).

Добавка № 2 включает дистиллированную воду и нанопорошок тетрафторбората аммония $NH_4[BF_4]$. На рисунке 4 представлена кинетика твердения образцов с добавкой № 2 в сравнении с контрольными образцами.

Добавка № 2 демонстрирует выраженный ускоряющий эффект твердения цементного камня. Уже на третьи сутки прочность образцов с оптимальным содержанием добавки (2,16 %) достигает 38–39 МПа, что превышает 28-суточную прочность контрольных образцов (68,44 МПа) уже к 7-м суткам.

Таким образом, наиболее эффективной оказалась добавка, изготовленная на основе нанопорошка тетрафторборат аммония.

Для визуальной оценки качества изготовления и характера разрушения образцов на различных этапах эксперимента производилась фотофиксация (рис. 5).

Таблица 1

Прочностные характеристики контрольных образцов цементного камня

Наименование образца	Добавка, %	Средняя прочность на сжатие, МПа				
		сутки				
		3	7	14	21	28
Контрольные образцы	0	21,7	32,5	42,7	47,1	49,8

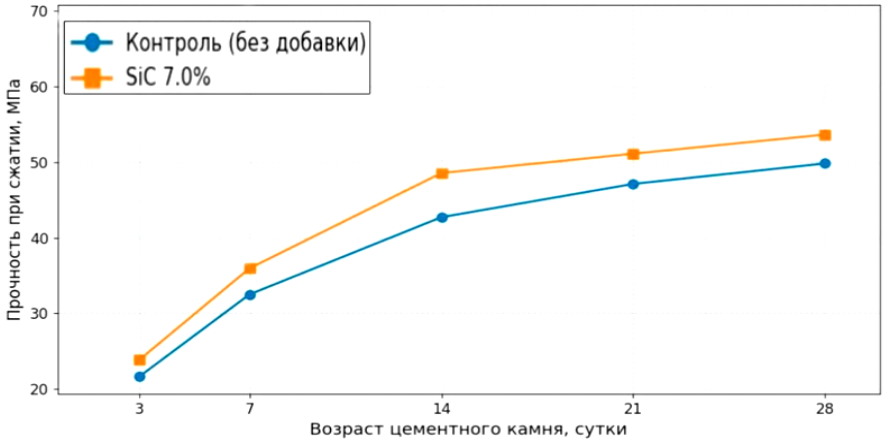


Рисунок 3 — Кинетика твердения цементного камня с добавкой № 1

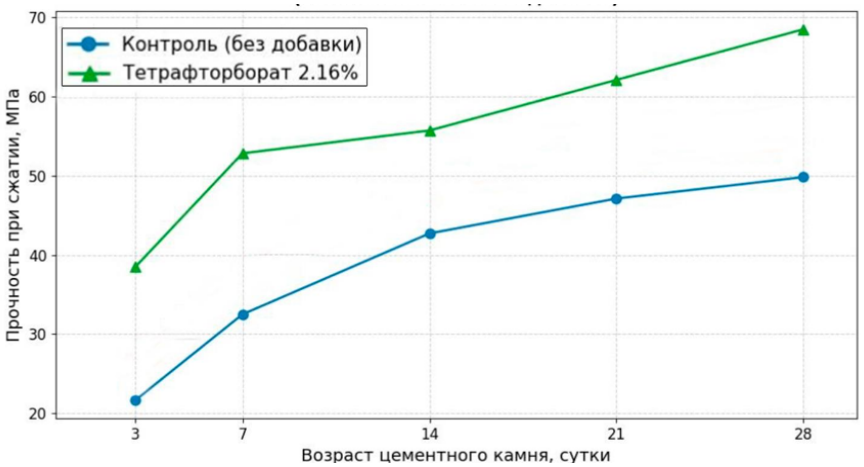
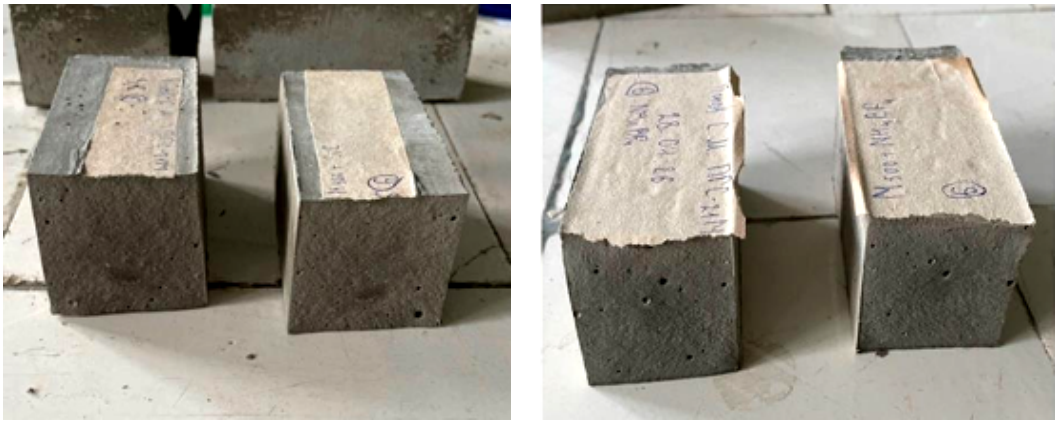


Рисунок 4 — Кинетика твердения цементного камня с добавкой № 2



а б

Рисунок — 5 Внешний вид образцов после испытания на прочность (28-е сутки): а) образец с добавкой № 1 (SiC); б) образец с добавкой № 2 ($NH_4[BF_4]$)

Визуальный осмотр образцов показывает, что образцы с добавкой № 2 (тетрафторборат аммония) характеризуются более плотной и однородной структурой по сравнению с контрольными образцами и образцами с добавкой № 1 (карбид кремния). У контрольных образцов преобладает хрупкое разрушение с образованием крупных осколков, тогда как образцы с добавкой № 2 демонстрируют более пластичное разрушение с развитой сетью микротрещин. Данные визуальные наблюдения коррелируют с результатами прочностных испытаний и подтверждают эффективность исследуемых добавок, особенно на основе тетрафторбората аммония, обеспечивающего наиболее плотную структуру цементного камня.

Выводы и направление дальнейших исследований. Соединения на основе фторборатов, согласно теоретическим предпосылкам, обладают высоким потенциалом для дальнейшего использования в качестве доступных и технологичных компонентов нанодобавок в бетон.

Предполагаемый механизм их действия — связывание гидроксида кальция с образованными нанодисперсными труднорастворимыми фазами.

Согласно результатам исследования, добавка на основе тетрафторбората аммония может быть рекомендована в качестве высокоэффективного ускорителя твердения цементного камня.

Незначительное удорожание (менее 2 % от стоимости изготавливаемого конструктивного элемента) полностью окупается за счет ускорения работ и/или экономии материала, что подтверждает экономическую целесообразность применения добавки на основе тетрафторбората аммония в монолитном строительстве.

Список источников

1. Гончаренко А. А. Высокопрочные бетоны как бетоны нового поколения // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. 2017. № 3–2 (5). С. 130–132. EDN YPULOW

2. Carbon fibers reinforced high-strength concrete: a brief insight / R. Kampayana, M. I. Rynkovskaya, G. M. Dabi, A. A. Q. Qais // Экономика строительства. 2024. № 4. С. 374–377. EDN HIXIBI

3. Bezgodov I. M., Kaprielov S. S., Sheynfeld A. V. Relationship between strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting concrete // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18. Iss. 2. P. 175–183. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-175-183 EDN AVEAKR

4. Цементно-полимерный бетон с комплексними добавками / В. С. Гвоздь, В. В. Душин, Д. Б. Романенко, А. И. Сема // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Економіка і менеджмент. 2012. № 5. С. 49–50. EDN SXYRED

5. Физико-механические свойства композитных бетонов, модифицированных углеродными нанотрубками / И. Н. Бурмистров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 13. С. 80–89. EDN PXLGZV

6. Concretes with additives produced by sol-gel method / L. A. Urkhanova [et al.] // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2025. Vol. 21. Iss. 4. P. 83–93. DOI: 10.22337/2587-9618-2025-21-4-83-93 EDN TPMWEI.

7. Влияние комплексных модифицирующих добавок на эксплуатационные свойства тяжелого бетона / О. В. Демьяненко, А. А. Куликова, Н. О. Копаница, А. Г. Петров // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 5 (749). С. 23–32. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-749-5-23-32 EDN HMIFNT

8. Демьяненко О. В., Куликова А. А., Копаница Н. О. Оценка влияния комплексной полифункциональной добавки на эксплуатационные характеристики цементного камня и бетона // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 5. С. 139–152. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-139-152 EDN LYFZGI

9. Чесноков А. С., Баранова В. И., Карпов С. Л. Применение нанодисперсного диоксида кремния в строительных материалах // Инженерные системы и сооружения. 2019. № 2 (35). С. 78–82. EDN BBCLYX

10. Ляшенко Д. А., Перфилов В. А. Наномодифицированная цементная композиция // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 7. С. 1116–1124. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1116-1124 EDN WXJKYN

11. Макушина Ю. В. К вопросу об идентификации добавок-пластификаторов для бетонов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 2 (51). С. 90–96. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-2/90-96/ EDN SXZNGF

12. Lyashenko D. A., Perfilov V. A. Modification of fine-grained concrete with carbon nanotubes // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2024. Vol. 9. Iss. 2. P. 91–99. DOI: 10.17277/jamt.2024.02.pp.091-099 EDN OXRTCW

13. Логинова С. А., Гоглев И. Н. Оценка влияния комплексной добавки на основе фторидов кальция, натрия и силиката натрия на физико-механические свойства цементных бетонов // Экономика строительства. 2025. № 11. С. 654–656. EDN AGKDRI

14. Васильева Е. В., Федоров В. М. Элементы из бетона на некондиционных заполнителях для проводящей сети мелиоративных систем // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 4 (72). С. 487–500. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-49 EDN KPOPGD

15. Кузьмина В. П. Механизмы воздействия нанодобавок на цементные продукты // Сухие строительные смеси. 2020. № 2. С. 25–27. EDN MTSPAI

© Логинова С. А., Савченко А. Е., 2026
© Таничев М. В., Гоглев И. Н., 2026

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. СА ДонГТУ Псюком В. В., к.т.н., доц. НПП «Кадастр» Ладыгиной О. В.

Статья поступила в редакцию 02.10.2026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Логинова Светлана Андреевна, *канд. техн. наук, доцент, доцент института инженеров строительства и транспорта*
Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия, e-mail: sl79066171227@yandex.ru

Таничев Максим Владимирович, *канд. техн. наук, доцент, доцент каф. транспорта и автомобильных дорог*
Ивановский государственный политехнический университет,
г. Иваново, Россия

Гоглев Илья Николаевич, *соискатель каф. транспорта и автомобильных дорог*
Ивановский государственный политехнический университет,
г. Иваново, Россия

Савченко Александр Ефимович, *магистр института инженеров строительства и транспорта*
Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия

Loginova S. A. *(Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia, e-mail: sl79066171227@yandex.ru)***, Tanichev M. V., Goglev I. N.** *(Ivanovo State Polytechnical University, Ivanovo, Russia)***, Savchenko A. E.** *(Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia)*

MODIFICATION OF CONCRETE STRUCTURE WITH NANOPARTICLES TO IMPROVE THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

The article addresses the impact of nanoparticles on the structure and properties of concrete. Various types of nanomodifiers are considered, including silicon carbide and ammonium tetrafluoroborate nanoparticles, which are introduced into the concrete mix to improve its physical and mechanical characteristics. The study determined that an additive based on ammonium tetrafluoroborate is the most effective accelerator for the hardening of cement stone. A slight cost increase (less than 2 %) is fully offset by the acceleration of construction works and material savings, which makes its application in monolithic construction economically justified.

Key words: *nanoparticles, concrete, physical and mechanical properties, modification, durability.*

References

1. Goncharenko A. A. High-strength concrete as a new generation of concrete [Vysokoprochnye betony kak betony novogo pokoleniya]. Vestnik Lugansk Vladimir Dahl state university. 2017. No. 3–2 (5). Pp. 130–132. EDN YPULOW

2. Kampayana R., Rynkovskaya M. I., Dabi G. M., Qais A. A. Q. Carbon fibers reinforced high-strength concrete : a brief insight. Ekonomika stroitel'stva. 2024. No. 4. Pp. 374–377. EDN HIXIBI

3. Bezgodov I. M., Kaprielov S. S., Sheynfeld A. V. Relationship between strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting concrete. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18. No 2. Pp. 175–183. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-175-183 EDN AVEAKR

4. Gvozd' V. S., Dushin V. V., Romanenko D. B., Sema A. I. Cement-polymer concrete with complex additives [Cementno-polimernyj beton s kompleksnimi dobavkami]. Bulletin of Sumy National Agrarian University. 2012. No. 5. Pp. 49–50. EDN SXYRED

5. Burmistrov I. N. [et al.]. Physical and mechanical properties of composite concrete modified with carbon nanotubes [Fiziko-mekhanicheskie svojstva kompozitnyh betonov, modificirovannyh uglerodnymi nanotrubkami]. Modern Problems of Science and Education. 2013. No. 13. Pp. 80–89. EDN PXLGZV

6. Urkhanova L. A. [et al.] Concretes with additives produced by sol-gel method. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2025. Vol. 21. No 4. Pp. 83–93. DOI: 10.22337/2587-9618-2025-21-4-83-93 EDN TPMWEI

7. Dem'yanenko O. V., Kulikova A. A., Kopanica N. O., Petrov A. G. The influence of complex modifying additives on the performance properties of heavy concrete [Vliyanie kompleksnyh modificiruyushchih dobavok na ekspluatacionnye svojstva tyazhelogo betona]. News of higher educational institutions. Construction. 2021. No. 5 (749). Pp. 23–32. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-749-5-23-32 EDN HMIFNT

8. Dem'yanenko O. V., Kulikova A. A., Kopanica N. O. Assessing the influence of a complex multifunctional additive on the performance characteristics of cement stone and concrete [Ocenka vliyaniya kompleksnoj polifunkcional'noj dobavki na ekspluatacionnye harakteristiki cementnogo kamnya i betona]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2020. Vol. 22. No. 5. Pp. 139–152. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-139-152 EDN LYFZGI

9. Chesnokov A. S., Baranova V. I., Karpov S. L. Application of nanodispersed silicon dioxide in building materials [Primenenie nanodispersnogo dioksida kremniya v stroitel'nyh materialah]. Engineering Systems and Structures. 2019. No. 2 (35). Pp. 78–82. EDN BBCLYX

10. Lyashenko D. A., Perfilov V. A. Nanomodified cement composition [Nanomodificirovannaya cementnaya kompoziciya]. Vestnik MGSU. 2024. Vol. 19. No. 7. Pp. 1116–1124. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1116-1124 EDN WXJKYN

11. Makushina Yu. V. On the issue of identification of plasticizer additives for concrete [K voprosu ob identifikacii dobavok-plastifikatorov dlya betonov]. Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU. 2022. No. 2 (51). Pp. 90–96. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-2/90-96/ EDN SXZNGF

12. Lyashenko D. A., Perfilov V. A. Modification of fine-grained concrete with carbon nanotubes. Journal of Advanced Materials and Technologies. 2024. Vol. 9. No. 2. Pp. 91–99. DOI: 10.17277/jamt.2024.02.pp.091-099 EDN OXRTCW

13. Loginova S. A., Goglev I. N. Assessing the influence of a complex additive based on calcium, sodium and sodium silicate fluorides on the physical and mechanical properties of cement concrete [Ocenka vliyaniya kompleksnoj dobavki na osnove ftoridov kal'ciya, natriya i silikata natriya na fiziko-mekhanicheskie svojstva cementnyh betonov]. Ekonomika stroitel'stva. 2025. No. 11. Pp. 654–656. EDN AGKDRI

14. Vasil'eva E. V., Fedorov V. M. Elements made of concrete on substandard aggregates for the conductive network of drainage systems [Elementy iz betona na nekondicionnyh zapolnitelyah dlya provodyashchej seti meliorativnyh sistem]. Proceedings of Nizhnevolzskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education. 2023. No. 4 (72). Pp. 487–500. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-49 EDN KPOPGD

15. Kuz'mina V. P. Mechanisms of action of nanoadditives on cement products [Mekhanizmy vozdejstviya nanodobavok na cementnye produkty]. Suhie stroitel'nye smesi. 2020. No. 2. Pp. 25–27. EDN MTSPAI

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Loginova Svetlana Andreevna, *PhD in Engineering, Associate Professor, Assistant Professor of the Institute of Civil and Transport Engineers*
Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia, e-mail: sl79066171227@yandex.ru

Tanichev Maksim Vladimirovich, *PhD in Engineering, Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Transport and Highways*
Ivanovo State Polytechnical University,
Ivanovo, Russia

Goglev Il'ya Nikolaevich, *Applicant at the Department of Transport and Highways*
Ivanovo State Polytechnical University,
Ivanovo, Russia

Savchenko Aleksandr Efimovich, *Holder of a Master's Degree of the Institute of Civil and Transport Engineers*
Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia